半色调可视加密算法的综合评价算法 *

丁海洋[1,2]，连　帅[1]

(1. 北京印刷学院 信息工程学院，北京 102600; 2. 北京邮电大学 信息安全中心，北京 100876)

摘　要：已有半色调可视加密(HVC)算法的评价普遍采用正确解码率(CDR)或比特错误率(BER)，未考虑信息隐藏对载体图像造成的干扰。提出一种半色调可视加密算法的综合评价算法，综合考虑信息隐藏对载体图像造成的干扰和提取秘密图像的错误率。选择平均每像素干扰值(ADPP)衡量信息隐藏对载体图像造成的干扰，为保证 ADPP 和 BER 数据范围的一致性，采用秘密图像结合隐藏阈值 T 计算最大平均干扰值(MAD)，将 ADPP 和 BER 结合 MAD 和系数 λ 综合计算，得到半色调可视加密算法的综合干扰值(IDHVC)。该算法与已有综合评价算法相比在运算量方面具有明显优势。通过实验验证，该算法可应用于灰度和彩色半色调可视加密算法的综合评价。

关　键　词：半色调；可视加密；正确解码率；比特错误率；平均每像素干扰值

中图分类号：TP309.2　　doi: 10.19734/j.issn.1001-3695.2019.11.0702

Integrated evaluation algorithm for halftone visual cryptography methods

Ding Haiyang[1, 2], Lian Shuai[1]

(1. *College of Information Engineering*, *Beijing Institute of Graphic Communication*, *Beijing* 102600, *China*; 2. *Information Security Center*, *Beijing University of Posts & Telecommunications*, *Beijing* 100876, *China*)

Abstract: Previous papers generally used CDR or BER to evaluate the performance of halftone visual cryptography (HVC) methods, but the distortion caused during data hiding process is not considered. This paper proposed an integrated evaluation algorithm for halftone visual cryptography methods which considered both the distortion caused by data hiding and BER of the extracted secret image. Choosing ADPP to measure the distortion caused during data hiding process, and to ensure the consistency of ADPP and BER data ranges, the max average distortion (MAD) could be generated by using the secret image and the threshold T, and then integrated distortion of halftone visual cryptography (IDHVC) could obtained by compressive calculation of BER, ADPP, MAD and coefficient λ. Compared with the existing algorithm, the proposed method has obvious advantage in the amount of computation. Experimental results show the proposed algorithm can evaluate halftone visual cryptographies in grayscale and color halftone images.

Key words: halftone; visual cryptography; correct decode rate (CDR); bit error rate (BER); average distortion per pixels (ADPP)

0　引言

半色调图像[1]是一种特殊的图像载体，仅通过黑白两个颜色值来表示一幅图像。常用的图像隐藏算法不能直接应用到半色调图像中，半色调图像的信息隐藏成为图像隐藏中的一个新分支。将一幅连续调图像生成半色调图像的方法，称为半色调方法(或加网方法)，主要包括：规则抖动[2]、误差扩散[3,4]、点扩散[5~8]、直接二值搜索[9~12]。

在一幅半色调图像中，通过修改半色调图像的局部区域特征实现水印信息隐藏，称为网点水印[13~17]，主要适用于基于规则抖动的半色调图像。

由于规则抖动方法生成的半色调图像质量一般，为提高图像质量，目前更多采用误差扩散和点扩散方法，针对这两类半色调图像主要采用半色调可视加密(halftone visual cryptography，HVC)算法，即通过修改多幅半色调图像对应像素的相对关系，将一幅二值的秘密图像隐藏在多幅半色调图像中。在半色调可视加密中，最常用的是(2,2)HVC[18~24,26,27]，即将一幅秘密图像隐藏在两幅半色调图像中，提取信息时也需要两幅半色调图像。

根据半色调可视加密算法适用半色调图像类型不同，可以分为灰度半色调可视加密算法[18-19,23]和彩色半色调可视加密算法[20,22]。

文献[18]中提出了基于误差扩散的共轭半色调信息隐藏(DHCED)，第一幅半色调图像采用正常加网方法生成，通过修改另一幅半色调图像的加网过程实现信息隐藏。文献[19]中则将 DHCED[18]从误差扩散扩展到点扩散半色调图像中，提出基于点扩散的共轭半色调信息隐藏(DHCDD)；并且提出基于点扩散的双向共轭信息隐藏算法(DHDCDD)，即从两幅半色调图像中选择数据进行修改，通过双向共轭实现信息隐藏。

文献[20]中将 DHDCDD[19]从灰度半色调图像扩展到彩色半色调图像，提出彩色双向共轭点扩散数据隐藏(DCCDD)，将秘密图像隐藏在彩色点扩散半色调图像中。文献[21]提出一种基于多尺度误差扩散的半色调可视加密算法。文献[22]中将 DCCDD 扩展到基于误差扩散的彩色半色调图像，实现彩色双向共轭误差扩散数据隐藏(DCCED)，并且针对彩色半色调图像提出新共轭的概念，将新共轭概念应用到基于误差扩散和点扩散半色调图像中，提出基于误差扩散的新共轭数据隐藏算法(NCCED)和基于点扩散的新共轭数据隐藏算法(NCCDD)。

文献[23]中将不同灰度半色调可视加密算法进行实现和

收稿日期：2019-11-13；**修回日期：**2020-02-05　**基金项目：**北京市教委科研计划重点项目(KZ201710015010)；国家级大学生创新创业计划资助项目(22150119004/016)；科研水平提高定额项目(PXM2017_014223_000063)

作者简介：丁海洋(1979-)，男，河南郑州人，讲师，博士，主要研究方向为半色调信息隐藏、图像水印(o_dhy@163.com)；连帅(1993-)，男，河南郑州人，硕士研究生，主要研究方向为半色调信息隐藏、可逆水印.

扩展，根据实验结果得出结论：采用双向共轭的信息隐藏算法性能优于采用单向共轭的算法。文献[24]为提高半色调可视加密算法性能提出块共轭的概念，并提出基于块共轭的高图像质量半色调秘密图案隐藏算法。文献[25]提出基于点扩散和误差扩散的半色调自隐藏算法，将秘密图像隐藏在一幅半色调图像中。

以上各半色调可视加密算法普遍采用正确解码率(CDR)对算法性能进行评价。由于半色调的信息隐藏算法都是通过刻意修改半色调过程来实现信息隐藏，而修改过程必然对半色调图像数据产生一定干扰，如果承受的干扰越大，则实现信息隐藏的效果越好，提取秘密图像的 CDR 越高；反过来讲，如果 CDR 越高，往往生成半色调图像的质量受到影响越大。所以，单纯采用 CDR 评价半色调可视加密算法的性能，不够合理。

文献[26,27]中提出了一种对半色调信息隐藏算法的综合干扰评价公式，以该公式为基础提出半色调信息隐藏算法的优化理论，并提出单向误差扩散信息隐藏算法和双向误差扩散的信息隐藏算法。但该文献重点是提出自己的算法，并未将该公式用于该文算法和其他算法的评价。。

本文提出一种半色调可视加密算法的综合评价算法，综合考虑信息隐藏对载体图像造成的干扰和提取秘密图像的BER，本文选择平均每像素干扰值(ADPP)[22]衡量信息隐藏对载体图像造成的干扰。首先计算提取秘密图像的错误率(BER=1-CDR)，然后计算信息隐藏造成的平均每像素干扰值(ADPP)，为保证 ADPP 和 BER 数据范围的一致性，采用秘密图像和隐藏阈值计算最大平均干扰值(MAD)，将 ADPP 和 BER 结合 MAD 和系数 λ 综合计算，得到半色调可视加密算法的综合干扰值(Integrated Distortion of HVC, IDHVC)，综合干扰值越小，算法性能越好。通过实验验证，IDHVC 可以综合反映 HVC 算法对载体图像的干扰和提取秘密图像的错误率，该算法可用于评价灰度和彩色半色调可视加密算法。

本文包括以下五部分：1. 回顾已有主要算法；2. 本文提出的半色调可视加密算法的综合评价算法；3. 实验结果与分析；4. 结论。

1　已有的工作

文献[18~23]中，有 8 种主要半色调可视加密算法，DHCED[18]、DHDCED[23]可应用在基于误差扩散的灰度半色调图像，DHCDD[19]、DHDCDD[19]可应用在基于点扩散的灰度半色调图像；DCCED[22]、NCCED[22]可应用在基于误差扩散的彩色半色调图像，DCCDD[20]和 NCCDD[22]可应用在基于点扩散的彩色半色调图像。

下面先介绍主要的半色调可视加密算法。设 X_1 和 X_2 表示原始图像，Y_1 和 Y_2 表示信息隐藏后生成的半色调图像，W 表示待隐藏的秘密图像。

1.1　DHDCDD 和 DHDCED

DHDCDD[19]和 DHDCED[23]都是采用双向共轭方法将一幅秘密图像隐藏在两幅灰度半色调图像中，实现过程相同，只是误差扩散的控制方法不同，DHDCDD[19]采用点扩散方法，DHDCED[23]采用误差扩散方法。实现流程：

a) 当 $x_1(i,j)$和 $x_2(i,j)$进入系统后，叠加扩散误差生成 $u_1(i,j)$和 $u_2(i,j)$。

b) $u_1(i,j)$和 $u_2(i,j)$经过尝试量化后得到尝试量化值 $y_{1,trial}(i,j)$和 $y_{2,trial}(i,j)$，1)-2)通过公式(1)-(3)实现。

c) 判断 $y_{1,trial}(i,j)$和 $y_{2,trial}(i,j)$是否是需要的值，即当秘密图像数据 $w(i,j)$为 0(黑)时，保证 $y_2(i,j)$与 $y_1(i,j)$共轭；当 $w(i,j)$为 1(白)时，保证 $y_2(i,j)$与 $y_1(i,j)$相同。

d) 如果 $y_{1,trial}(i,j)$和 $y_{2,trial}(i,j)$满足 3)的需要，则直接将 $u_1(i,j)$和 $u_2(i,j)$传递给 $u_1'(i,j)$和 $u_2'(i,j)$，即 $u_1'(i,j)= u_1(i,j)$和 $u_2'(i,j)= u_2(i,j)$。

e) 如果 $y_{1,trial}(i,j)$和 $y_{2,trial}(i,j)$不满足 3)的需要，则需要 $y_{1,trial}(i,j)$或 $y_{2,trial}(i,j)$进行置换处理，有两种置换方案：置换 $y_{1,trial}(i,j)$，计算置换干扰 Δu_1；置换 $y_{2,trial}(i,j)$，计算置换干扰 Δu_2。选择哪个方案，要看哪个方案造成的置换干扰 Δu 小。

f) Δu_1 和 Δu_2 的计算与置换方向有关，如果 $y_{1,trial}(i,j)$或 $y_{2,trial}(i,j)$从 255→0，则使用式(4)计算；如果 $y_{1,trial}(i,j)$或 $y_{2,trial}(i,j)$从 0→255，使用式(5)计算。

g) 如果 $\min(\Delta u_1,\Delta u_2)$<=阈值 T，则选择干扰小的方向进行置换处理。

h) 如果 $\min(\Delta u_1,\Delta u_2)$>T，则不进行置换处理。

i) 使用以上过程对 X_1 和 X_2 完成整幅图像处理后，生成半色调图像 Y_1 和 Y_2。

该算法优点是提出双向共轭的概念，但缺点是只能应用在灰度半色调图像中。

$$u(i,j) = x(i,j) + \sum h(k,l) \times e(i-k, j-l) \tag{1}$$

$$y(i,j) = \begin{cases} 0, & u(i,j) < 128 \\ 255, & u(i,j) \ge 128 \end{cases} \tag{2}$$

$$e(i,j) = u(i,j) - y(i,j) \tag{3}$$

$$\Delta u(i,j) = |127 - u(i,j)| \tag{4}$$

$$\Delta u(i,j) = |128 - u(i,j)| \tag{5}$$

1.2　NCCDD 和 NCCED

文献[22]针对彩色半色调图像定义新共轭概念(New Conjugate，NC)，而 NC 值可以通过式(6)计算，这里 *Numof255* 表示 3 个彩色分量中等于 255 的数目，如果有 2/3 个分量等于 255，则 NC 值为 1；如果有 0/1 个分量等于 255，则 NC 值为 0。

$$NC = \begin{cases} 1 & Numof\,255 = 2 \text{ or } 3 \\ 0 & Numof\,255 = 0 \text{ or } 1 \end{cases} \tag{6}$$

Y_1 和 Y_2 表示两幅彩色半色调图像，则 $NC_{y1}(i,j)$和 $NC_{y2}(i,j)$表示 $y_1(i,j)$和 $y_2(i,j)$的 NC 值，如果 $NC_{y1}(i,j) \oplus NC_{y2}(i,j)=1$，则表示 $y_1(i,j)$和 $y_2(i,j)$新共轭；如果 $NC_{y1}(i,j) \oplus NC_{y2}(i,j)=0$，则表示 $y_1(i,j)$和 $y_2(i,j)$相同。

当 $x_1(i,j)$和 $x_2(i,j)$进入系统后，可使用式(1)~(3)计算尝试量化值 $y_{1,trial}(i,j)$和 $y_{2,trial}(i,j)$，使用式(6)计算 $NC_{y1,trial}(i,j)$和 $NC_{y2,trial}(i,j)$，判断 $NC_{y1,trial}(i,j)$和 $NC_{y2,trial}(i,j)$是否是需要的值，如果不是需要的值，则需要对 $y_{1,trial}(i,j)$和 $y_{2,trial}(i,j)$进行置换处理。

1.3　半色调可视加密算法的 CDR 比较

1)灰度半色调可视加密算法的 CDR 比较

在文献[23]中，通过计算提取秘密图像的提取正确率(CDR)来评价灰度半色调可视加密算法的性能。使用式(7)计算 CDR，其中提取的秘密图像为 E，W 表示原始秘密图像，E 和 W 的分辨率都是 W×H。

$$CDR = \sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}[w(i,j)\overline{\oplus}e(i,j)]/(W \times H) \tag{7}$$

根据实验结果得到结论，在灰度半色调可视加密算法中：

a) 基于误差扩散的算法中，DHDCED(Jarvis) [23]算法性能最好；

b) 基于点扩散的算法中，DHDCDD[19]算法性能最好；

c) 无论是基于误差扩散，还是基于点扩散的算法，双向共轭算法的 CDR 都高于单向共轭算法的 CDR；

d) 在所有灰度半色调图像信息隐藏算法中，DHDCED(Jarvis)[23]算法性能最好。

2)彩色半色调可视加密算法的 CDR 比较

算法 DCCED[22]和 DCCDD[20]都使用式(8)计算平均 CDR。

算法 NCCED[22]和 NCCDD[22]采用式(9)计算提取的秘密图像 E，再使用式(7)计算 CDR。

$$CDR=\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}|w(i,j)\overline{\oplus}e_r(i,j)|/(W\times H)+\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}|w(i,j)\overline{\oplus}e_g(i,j)|/(W\times H)+\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}|w(i,j)\overline{\oplus}e_b(i,j)|/(W\times H) \tag{8}$$

$$e(i,j)=NC_{y1}(i,j)\overline{\oplus}NC_{y2}(i,j) \tag{9}$$

在文献[22]中，根据实验结果得到结论，在彩色半色调可视加密算法中：

a) NCCED[22]算法的 CDR 明显高于 DCCED[22]算法；

b) NCCDD[22]算法的 CDR 明显高于 DCCDD[20]算法；

c) NCCED[22]在所有算法中，具有最高的 CDR。

1.4　综合干扰评价公式

在文献[26，27]中，提出对半色调信息隐藏算法的综合干扰评价公式，采用式(10)表示，其中 D_h 表示信息隐藏对载体图像的干扰，D_w 表示提取秘密图像的错误率，λ 表示综合计算系数，综合计算值越小，算法性能越好。

$$D_h+\lambda*D_w \tag{10}$$

1.5　平均每像素干扰(ADPP)

文献[22]针对彩色半色调可视加密算法定义平均每像素干扰(average distortion per pixel，简称 ADPP)，使用式(11)计算：

$$ADPP=\frac{\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}(dis_r(i,j)+dis_g(i,j)+dis_b(i,j))}{W\times H} \tag{11}$$

2　半色调可视加密算法的综合评价算法

本文提出一种半色调可视加密算法的综合评价算法，算法流程见图 1。

根据文献[26，27]中的思路，需要获取信息隐藏对载体图像的干扰 D_h 和提取秘密图像的错误率 D_w，并进行综合运算。本文选择最大平均每像素干扰值(ADPP)[22]作为 D_h；用提取秘密图像 E 的错误率 BER 作为 D_w；在进行综合运算时，需要考虑 ADPP 和 BER 的取值范围，需要使用秘密图像 W 和阈值 T 计算最大平均干扰值(MAD)；最后为突出 BER 的重要性，增加系数 λ 完成综合计算。

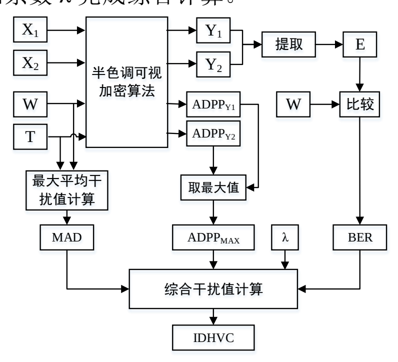


图 1　半色调可视加密算法的综合评价算法

Fig. 1　Integrated evaluation algorithm for halftone visual cryptography methods

本文提出的综合评价算法的流程为

a) X_1 和 X_2 为原始图像，X_1 和 X_2 的分辨率都是 W×H。

b) 通过半色调可视加密算法，将一幅秘密图像 W 隐藏在 X_1 和 X_2 生成的半色调图像中，生成 Y_1 和 Y_2；这里的半色调可视加密算法可以是文献[18-23]中任意一种半色调可视加密算法。在信息隐藏过程中，需要受到阈值 T 的控制，T_b 和 T_w 分别表示秘密图像中黑点区域和白点区域对应的阈值。

c) 在信息隐藏的过程中，使用式(11)或(12)统计平均每像素干扰值(ADPP)，需要分别针对 Y_1 和 Y_2 统计，所以会得到 $ADPP_{Y1}$ 和 $ADPP_{Y2}$。针对彩色半色调可视加密算法采用式(11)统计 ADPP，针对灰度半色调可视加密算法采用式(12)统计 ADPP。

$$ADPP=\frac{\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}dis(i,j)}{W\times H} \tag{12}$$

d) 将生成的 Y_1 和 Y_2 进行提取运算，可得到提取的秘密图像 E。

e) 将提取的秘密图像 E 与原始秘密图像 W 进行比较，使用式(7~9)可得到提取正确率(CDR)，再计算 BER(BER=1-CDR)，BER 的取值范围为[0,1]。

f) 针对两个 ADPP 值取最大值，得到 $ADPP_{MAX}$，ADPP 的取值范围为[0-MAD]，MAD 是最大平均干扰值，MAD 由秘密图像 W、阈值 T_b 和 T_w 决定。

g) 结合秘密图像 W、阈值 T_b 和 T_w，采用式(13)计算得到 MAD 值。

h) 综合 $ADPP_{MAX}$、BER、MAD、系数 λ，使用式(14)计算得到综合干扰值(IDHVC)。综合干扰值越小，算法性能越好。

本文提出的综合评价算法，有下面 4 部分需要说明：

2.1　选择 ADPP 作为对载体图像的干扰

ADPP 可用于衡量半色调信息隐藏算法造成的干扰，而且运算过程简单，只需要在信息隐藏的同时对干扰值进行统计，相比与文献[26]中采用的人类视觉峰值信噪比(HPSNR)大大降低运算量，具体分析见本文 3.3 部分，所以本文选择 ADPP 作为对载体图像的干扰 D_h。

2.2　计算 ADPPMAX

在信息隐藏过程中，针对 Y1 和 Y2 分别计算 ADPP，会得到 $ADPP_{Y1}$ 和 $ADPP_{Y2}$ 两个值，本算法中采用最大 ADPP 值，而不是平均 ADPP 值，主要原因：

a) 对单向信息隐藏算法 $ADPP_{Y1}$ 为 0，而 $ADPP_{Y2}$ 较大；

b) 对双向信息隐藏算法会出现一个 ADPP 较小，而另一个 ADPP 较大的情况，ADPP 较大则说明该图像受到信息隐藏算法的干扰较大，图像质量受到影响较大；

c) 平均 ADPP 不能反映生成的 Y_1 或 Y_2 受影响的情况。

所以，本文采用 $ADPP_{MAX}$ 作为综合干扰值计算的基础。

2.3　综合计算需要增加的参数

本文选择最大 ADPP 作为 D_h；用提取秘密图像 E 的错误率 BER 作为 D_w，根据式(10)进行综合计算，但要先针对 ADPP 和 BER 进行一致性分析：

1) 计算点数

BER 先统计错误点数总和，再除上秘密图像的总点数 W×H；ADPP 先统计各点的干扰值总和，再除上载体图像的总点数 W×H；秘密图像和载体图像宽高相同，在这方面两者一致。

2) 取值范围

BER 的取值范围为[0,1]，而 ADPP 的取值范围为[0-MAD]。MAD 是最大平均干扰值，取决于信息隐藏过程中的阈值 T，T_b 和 T_w 表示秘密图像中黑点区域和白点区域对应的阈值。所以 MAD 需要先统计当前秘密图像 W 中的黑点比例 $Black_{percent}$ 和白点比例 $White_{percent}$，再采用公式(13)计算 MAD。

$$MAD=Black_{percent}\times T_b+White_{percent}\times T_w \tag{13}$$

将 $ADPP_{MAX}$ 除上 MAD，则保证取值范围也是[0,1]。

3) 突出 BER 的重要性

在半色调信息隐藏中，虽然 BER 和 ADPP 都很重要，但为保证信息隐藏的效果，需要突出 BER 的重要性，所以综合运算过程中，需要在 BER 前增加一个的乘性系数 λ(λ>2)。

2.4　综合干扰值计算

综合上面的分析，综合干扰值需要综合 $ADPP_{MAX}$、BER、

MAD、系数 λ，使用公式(14)计算，得到 IDHVC：

$$IDHVC = \frac{ADPP_{MAX}}{MAD} + \lambda \times BER \qquad (14)$$

3　实验结果与分析

图 2 为本文的实验测试图像和待隐藏的秘密图像，其中图(a-d)为灰度测试图像，图(e-h)为彩色测试图像，图(i)为秘密图像，所有测试图像和秘密图像分辨率均为 512×512。本文提出的综合评价算法，可应用于评价灰度和彩色半色调可视加密算法。

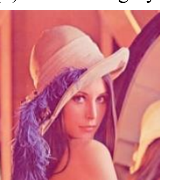
3.1　灰度半色调可视加密算法的综合评价

本文针对 DHCDD[19]、DHDCDD[19]、DHCED[18]、DHDCED[23]四种算法进行评价。

在实验过程中，阈值 T_b 和 T_w 分别与秘密图像的黑点区域和白点区域对应。在误差扩散过程中，分别使用 Floyd-steinberg 和 Jarvis 分散核。在点扩散过程中，使用基于 HVS 的等级矩阵。

另图 2(a)作为 X_1，图 2(b)-(d)分别作为 X_2，图 2(i)为秘密图像 W，可产生 3 组测试集。分别针对 4 种算法在不同阈值下实现信息隐藏，使用式(7)计算提取秘密图像的 CDR，并且计算 BER(BER=1-CDR)，针对 3 组测试集计算每种算法中每个阈值参数下的平均 BER，实验结果见表 1。





(a)'Lena'-gray　(b)'Mandrill'-gray　(c) 'F16'-gray.　(d)'pepper'-gray　(e)'Lena'-color.　(f)'Mandrill'-color　(g) 'F16'-color.　(h) 'pepper'-color.　(i)BIGC

图 2　测试图像和秘密图像

Fig. 2　Test images and secret image

表 1　灰度半色调可视加密算法的平均 BER 统计

Tab. 1　Average BER of halftone visual cryptography in gray-scale halftone image

算法名称	半色调方法	算法特征	不同阈值下的 BER			
			T_b=15,T_w=15	T_b=15,T_w=25	T_b=15,T_w=35	T_b=15,T_w=45
DHCDD[19]	点扩散	单向共轭	0.3794	0.3295	0.2967	0.2728
DHDCDD[19]	点扩散	双向共轭	0.3156	0.2684	0.2382	0.2151
DHCED(floyd-steinberg) [18]	误差扩散	单向共轭	0.3731	0.3204	0.2905	0.2742
DHCED(Jarvis) [18]	误差扩散	单向共轭	0.2802	0.2601	0.2476	0.2347
DHDCED(floyd-steinberg) [23]	误差扩散	双向共轭	0.3017	0.2655	0.2497	0.2350
DHDCED(Jarvis) [23]	误差扩散	双向共轭	0.2541	0.2343	0.2127	0.1915

信息隐藏中采用式(12)计算 ADPP，计算每种算法中每个阈值参数下的平均 ADPP，实验结果见表 2。

表 2　灰度半色调可视加密算法的平均 ADPP 统计

Tab. 2　Average ADPP of halftone visual cryptography in gray-scale halftone image

算法名称	不同阈值下的 ADPP							
	T_b=15,T_w=15		T_b=15,T_w=25		T_b=15,T_w=35		T_b=15,T_w=45	
	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2
DHCDD[19]	0.0000	0.8333	0.0000	1.8967	0.0000	3.3367	0.0000	5.1033
DHDCDD[19]	0.7000	0.7333	1.5533	1.6567	2.7100	2.9133	4.0867	4.4300
DHCED(floyd-steinberg) [18]	0.0000	0.8106	0.0000	1.7833	0.0000	3.0367	0.0000	4.5502
DHCED(Jarvis) [18]	0.0000	1.5633	0.0000	3.3133	0.0000	5.7533	0.0000	8.6400
DHDCED(floyd-steinberg) [23]	0.6733	0.6933	1.4800	1.5467	2.6700	2.8033	4.2267	4.4733
DHDCED(Jarvis) [23]	1.3867	1.4633	3.2600	3.4367	5.6233	5.9433	8.0700	8.5400

针对两个 ADPP 值取最大值，得到 $ADPP_{MAX}$，实验结果见表 3。秘密图像 W 结合不同阈值 T，采用式(13)计算得到最大平均干扰值 MAD，实验结果见表 4。综合 $ADPP_{MAX}$、BER、MAD、系数 λ，使用式(14)计算得到 IDHVC，实验结果见表 5，其中取 λ=3。从表 5 可看出，针对灰度半色调可视加密算法中：

a) 基于误差扩散的算法中，DHDCED(Jarvis)[23]算法性能最好；

b) 基于点扩散的算法中，DHDCDD[19]算法性能最好；

c) 无论是基于误差扩散，还是基于点扩散的算法，双向共轭算法的 CDR 都高于单向共轭算法的 CDR；

d) 在所有灰度半色调图像信息隐藏算法中，DHDCED(Jarvis) [23]算法性能最好。

以上结论和文献[23]的结论一致，但是通过 IDHVC 来比较，各算法的差距没有单纯看 CDR 时差距那么明显。

表 3　灰度半色调可视加密算法的 $ADPP_{MAX}$ 统计

Tab. 3　$ADPP_{MAX}$ of halftone visual cryptography in gray-scale halftone image

算法名称	不同阈值下的 ADPPMAX			
	Tb=15,Tw=15	Tb=15,Tw=25	Tb=15,Tw=35	Tb=15,Tw=45
DHCDD[19]	0.8333	1.8967	3.3367	5.1033
DHDCDD[19]	0.7333	1.6567	2.9133	4.4300
DHCED(floyd-steinberg) [18]	0.8106	1.7833	3.0367	4.5502
DHCED(Jarvis) [18]	1.5633	3.3133	5.7533	8.6400
DHDCED(floyd-steinberg) [23]	0.6933	1.5467	2.8033	4.4733
DHDCED(Jarvis) [23]	1.4633	3.4367	5.9433	8.5400

表 4　BIGC.BMP 不同阈值下的 MAD

Tab. 4　MAD of BIGC.BMP in different threshold

名称	不同阈值下的 MAD			
	T_b=15,T_w=15	T_b=15,T_w=25	T_b=15,T_w=35	T_b=15,T_w=45
最大平均干扰值	15	23.3266	31.6531	39.9797

3.2　彩色半色调可视加密算法的综合评价

本文针对 DCCDD[20]、NCCDD[22]、DCCED[22]、NCCED[22]四种算法进行评价。在误差扩散过程中，使用 Jarvis 分散核。在点扩散过程中，使用基于 HVS 的等级矩阵。

另图 2(e)作为 X_1，图 2(f)-(h)分别作为 X_2，，图 2(i)为秘密图像 W，可产生 3 组测试集。分别针对 4 种算法在不同阈值下实现信息隐藏，使用式(7)~(9)计算提取秘密图像的 CDR，并且计算 BER(BER=1-CDR)，针对 3 组测试集计算每种算法中每个阈值参数下的平均 BER，实验结果见表 6。在信息隐藏中采用式(11)计算 ADPP，计算每种算法中每个阈值参数下的平均 ADPP，实验结果见表 7。

表 5　灰度半色调可视加密算法的综合干扰值统计

Tab. 5　Integrated distortion of halftone visual cryptography in gray-scale halftone image

算法名称	不同阈值下的综合干扰值 IDHVC			
	T_b=15,T_w=15	T_b=15,T_w=25	T_b=15,T_w=35	T_b=15,T_w=45
DHCDD[19]	1.1938	1.0698	0.9955	0.9460
DHDCDD[19]	0.9957	0.8762	0.8066	0.7561
DHCED(floyd-steinberg) [18]	1.1733	1.0376	0.9674	0.9364
DHCED(Jarvis) [18]	0.9448	0.9223	0.9246	0.9202
DHDCED(floyd-steinberg) [23]	0.9513	0.8628	0.8377	0.8169
DHDCED(Jarvis) [23]	0.8599	0.8502	0.8259	0.7881

表 6　彩色半色调可视加密算法的平均 BER 统计

Tab. 6　Average BER of halftone visual cryptography in color halftone image

算法名称	半色调方法	算法特征	不同阈值下的 BER			
			T_b=15, T_w=15	T_b=15,T_w=25	T_b=15,T_w=35	T_b=15,T_w=45
DCCDD[20]	点扩散	双向共轭	2.2067	1.9165	4.8218	4.2087
NCCDD[22]	点扩散	双向共轭	0.9959	0.6849	2.1405	1.3386
DCCED[22]	误差扩散	双向共轭	4.3029	4.2393	9.4781	9.2867
NCCED[22]	误差扩散	双向共轭	1.5356	1.2759	2.5990	2.1751

表 7　彩色半色调可视加密算法的平均 ADPP 统计

Tab. 7　Average ADPP of halftone visual cryptography in color halftone image

算法名称	不同阈值下的 ADPP							
	T_b=15,T_w=15		T_b=15,T_w=25		T_b=15,T_w=35		T_b=15,T_w=45	
	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2
DCCDD[20]	2.2067	1.9165	4.8218	4.2087	5.7410	5.2069	5.8111	5.4288
NCCDD[22]	0.9959	0.6849	2.1405	1.3386	3.3888	2.0524	4.5487	2.8185
DCCED[22]	4.3029	4.2393	9.4781	9.2867	11.3657	11.1994	11.5852	11.4700
NCCED[22]	1.5356	1.2759	2.5990	2.1751	3.5005	2.9151	4.2534	3.5388

针对两个 ADPP 值取最大值，得到 $ADPP_{MAX}$，实验结果见表 8。由于秘密图像 W 和阈值 T 不变，所以最大平均干扰值 MAD 仍然见表 4。综合 $ADPP_{MAX}$、BER、MAD、系数 λ，使用式(14)计算得到 IDHVC，实验结果见表 9，其中取 λ=3。从表 9 的结果上看出，针对彩色半色调可视加密算法：

a) 针对彩色误差扩散半色调图像，NCCED[22]算法的性能明显高于 DCCED[22]算法；

b) 针对彩色点扩散半色调图像，NCCDD[22]算法的性能明显高于 DCCDD[20]算法；c) 针对彩色半色调图像，NCCED[22]在所有算法中，具有最好的性能。

以上结论和文献[22]的结论一致，由于 NCCED[22]和 NCCDD[22]算法，不仅 BER 低于 DCCED[22]和 DCCDD[20]，而且 ADPP 也明显较小，所以 NCCED[22]和 NCCDD[22]算法的综合干扰值 IDHVC 明显优于 DCCED[22]和 DCCDD[20]。

表 8　彩色半色调可视加密算法的 $ADPP_{MAX}$ 统计

Tab. 8　$ADPP_{MAX}$ of halftone visual cryptography in color halftone image

算法名称	不同阈值下的 $ADPP_{MAX}$			
	T_b=15,T_w=15	T_b=15,T_w=25	T_b=15,T_w=35	T_b=15,T_w=45
DCCDD[20]	2.2067	4.8218	5.7410	5.8111
NCCDD[22]	0.9959	2.1405	3.3888	4.5487
DCCED[22]	4.3029	9.4781	11.3657	11.5852
NCCED[22]	1.5356	2.5990	3.5005	4.2534

表 9　彩色半色调可视加密算法的综合干扰值统计

Tab. 9　Integrated distortion of halftone visual cryptography in color halftone image

算法名称	不同阈值下的综合干扰值			
	T_b=15,T_w=15	T_b=15,T_w=25	T_b=15,T_w=35	T_b=15,T_w=45
DCCDD[20]	1.0729	1.0044	0.9494	0.9107
NCCDD[22]	0.8248	0.6414	0.5268	0.4483
DCCED[22]	1.0333	1.1020	1.0398	0.9690
NCCED[22]	0.4210	0.3019	0.2567	0.2333

3.3　本文算法与已有算法对比

本文算法与文献[22][26]评价算法进行对比，见表 10，具体对比：a) 文献[22]采用 CDR 和 ADPP 评价算法性能，但是没有采用综合评价；b) 本文与文献[26]均采用综合评价算法，需要比较两者的运算量；c) 本文算法用提取秘密图像的错误率 BER 作为 D_w，文献[26]也可采用 BER 作为 D_w，D_w 运算量方面两者相同；d) 本文选择 ADPP 作为 D_h，而文献[26]以 HPSNR 作为 D_h，本算法与文献[26]算法的对比，重点是进行 ADPP 和 HPSNR 的运算量并进行对比。以灰度半色调图像为例，ADPP 计算见式(12)，而 HPSNR 计算采用式(15)。

$$HPSNR = 10\log_{10}\frac{W\times H}{\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W}[\sum_{m,n}g(m,n)\times(y(i+m,j+n))-x(i,j)]^2} \quad (15)$$

表 10　本文算法与已有算法对比

Tab. 10　Comparison between the proposed method and previous methods

评价参数		评价算法		
		本文算法 BER+ADPP	文献[22] 评价算法 CDR+ADPP	文献[26] 评价算法 BER+HPSNR
是否进行综合评价		(+)是	(-)否	(+)是
D_h 运算量	加法数量	W×H	W×H	7×7×W×H
	减法数量	0	0	W×H
	乘法数量	1	1	7×7×W×H+W×H
	除法数量	1	1	1
	对数运算	0	0	1

表 10 中，针对 D_h 部分的运算量进行对比，其中 W、H 为图像的宽高，本文算法 D_h 部分运算量见第 3 列；文献[26]算法由于需要采用专用滤波器(7×7)对每个像素点进行滤波，得到估计图像，再与原图计算 PSNR，计算过程明显复杂，涉及运算量见表 10 第 5 列。通过表 10 可看出，本文算法与已有的综合评价算法相比，在运算量方面具有明显的优势。

4　结束语

本文提出一种半色调可视加密算法的综合评价算法。首先计算提取秘密图像的错误率(BER)，然后计算信息隐藏造成的平均每像素干扰值(ADPP)，采用秘密图像和阈值计算最大平均干扰值(MAD)，将 ADPP 和 BER 结合 MAD 和系数 λ 综合计算，得到半色调可视加密算法的综合干扰值(IDHVC)，

综合干扰值越小，算法性能越好。本文算法与已有的综合评价算法相比，在运算量方面具有明显的优势。通过实验验证，IDHVC 可以综合反映 HVC 算法对载体图像的干扰和提取秘密图像的错误率，该算法可用于评价灰度和彩色半色调可视加密算法。

通过 IDHVC 比较，算法间差距有时没有单纯看 CDR 时那么明显，这样的性能比较更为客观，实际算法实现中，不能一味提高 CDR 或降低 BER，还要综合考虑对载体图像的干扰值。信息隐藏中，降低对载体图像的干扰，也是改进算法的一个方向。

参考文献：

[1] Bayers B E. An optimum method for two level rendition of continuous tone pictures [C]// Proc of IEEE International Communication Conference, 1973: 2611–2615

[2] Ulichney R A. The void-and-cluster method for dither array generation [C]// Proc of SPIE-The International Society for Optical Engineering 1993: 332–343.

[3] Jarvis J F, Judice C N, Ninke W H. A survey of techniques for the display of continuous-tone pictures on bilevel displays [J]. Computer Graphics and Image Processing. 1976, 5 (1): 13–40

[4] Li Xin. Edge-directed error diffusion halftoning [J]. IEEE Signal Process. Letters. 2006, 13 (11): 688-690

[5] Knuth D E. Digital halftones by dot diffusion [J]. ACM Transactions on Graphics. 1987, 6 (4): 245–273.

[6] Mese M, Vaidyanathan P P. Optimized halftoning using dot diffusion and methods for inverse halftoning [J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2000, 9 (4): 691–709.

[7] Guo Jingming, Liu Yunfu. Improved dot diffusion by diffused matrix and class matrix co-optimization [J]. IEEE transactions on image processing, 2009, 18 (8): 1804-1816.

[8] Liu Yunfu, Guo Jingming. New class tiling design for dot-diffused halftoning [J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2013, 22 (3): 1199-1208.

[9] Kim S H, Allebach J P. Impact of HVS models on model based halftoning [J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2002, 11 (3): 258-269.

[10] Goyal P, Gupta M, Staelin C, *et al.* Clustered-dot halftoning with direct binary search [J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2012, 22 (2): 473-487.

[11] Guo Jingjing, Liu Yunfu, Chang Jiayu. Efficient direct binary search using multiple lookup tables [J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2013, 22 (11): 4522-4531.

[12] Zhang Xujie, Allebach J. Quad-interleaved Block Level Parallel Direct Binary Search Algorithm [J]. Electronic Imaging. 2016, 20: 1-6.

[13] Kacker D, Allebach J P. Joint halftoning and water-marking [J]. IEEE Transactions on Signal Process. 2003, 51 (4): 1054–1068.

[14] Pei S C, Guo Jingming. High-capacity data hiding in halftone images using minimal-error bit searching and least-mean square filter [J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2006, 15 (6): 1665-1679.

[15] Guo Jingming. Watermarking in dithered halftone images with embeddable cells selection and inverse halftoning [J]. Signal Processing, 2008, 88 (1): 1496–1510.

[16] Orhan B, Gaurav S, Vishal M. Orientation modulation for data hiding in clustered-dot halftone prints [J] IEEE transactions on image processing. 2010, 19 (8): 2070-2084.

[17] 葛乃馨，曲一飞，王琪，等. 基于网点形状的半色调信息组合防伪算法 [J]. 计算机科学. 2018, 45 (11): 373-376, 408. (Ge Naixin, Qu yifei, Wang Qi, *et al.* Combined halftone information anti-counterfet algorithm based on dot shape [J]. Computer Science. 2018, 45 (11): 373-376, 408) .

[18] Fu Mingsun, Au O C. Steganography in halftone images: conjugate error diffusion [J]. Signal Processing. 2003, 83 (10): 2171–2178.

[19] Guo Yuanfang, Au O C, Tang K, *et al.* Data hiding in dot diffused halftone images [C]// IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Barcelona: IEEE Computer Society, 2011: 1–6

[20] Guo Yuanfang, Au O C, Tang Ketan, *et al.* Hiding a Secret Pattern into Color Halftone Images [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014, 8389, 465–474

[21] PoChyi S, TzungFu T, YuChien C. Visual secret sharing in halftone images by multi-scale error diffusion [J]. Multimed Tools Application. Published online: 30 May 2017

[22] Ding Haiyang, Yang Yixian. Data Hiding in Color Halftone Images Based on New Conjugate Property [J]. Computers and Electrical Engineering. 2018 (70): 302-316.

[23] Ding Haiyang. Realization and extension of data hiding methods in gary-scale halftone images [C]// International Conference on Applied Mechanics, Electronics and Mechatronics Engineering. Pennsylvania: DEStech Publications Inc, 2016: 65-70

[24] Ding Haiyang, Li Zichen, Yang Yixian, *et al.* High quality data hiding in halftone image based on block conjugate [J]. Chinese Journal of Electronics. 2018, 27 (1): 150-158

[25] 丁海洋. 基于点扩散和误差扩散的半色调自隐藏算法 [J]. 计算机应用研究. 2020, 37 (1): 245-250. (Ding Haiyang. Halftone self-hiding algorithms in dot diffused and error diffused halftone images [J]. Application Research of Computers. 2020, 37 (1): 245-250)

[26] Guo Yuanfang, Au O C, Zhou Jiantao, *et al.* Halftone image watermarking via optimization [J]. Signal Processing: Image Communication. 2016, 41: 85-100.

[27] Guo Yuanfang, Au O C, Wang Rui, *et al.* Halftone image watermarking by content aware double-sided embedding error diffusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2018, 27 (7): 3387-3402